ÎNCERCĂRI DE OBOSEALĂ LA ÎNCOVOIERE. DIAGRAMA WÖHLER

1. Scopul lucrării

Determinarea experimentală a limitei de rezistență la oboseală. Trasarea diagramei Wöhler.

2. Elemente teoretice

2.1. Cicluri de solicitări variabile

Un *ciclul de solicitare variabilă*, figura 1, este definit prin următoarele mărimi, [1], [2]:

– *tensiunea maximă* σ_{max} și *tensiunea minimă* σ_{min} – se determină cu relațiile din „*Rezistența materialelor*";

– *tensiunea medie* $$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (1)$$

– *amplitudinea tensiunii* $$\sigma_v = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2)$$

– *caracteristica ciclului (coeficient de asimetrie)* $$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (3)$$

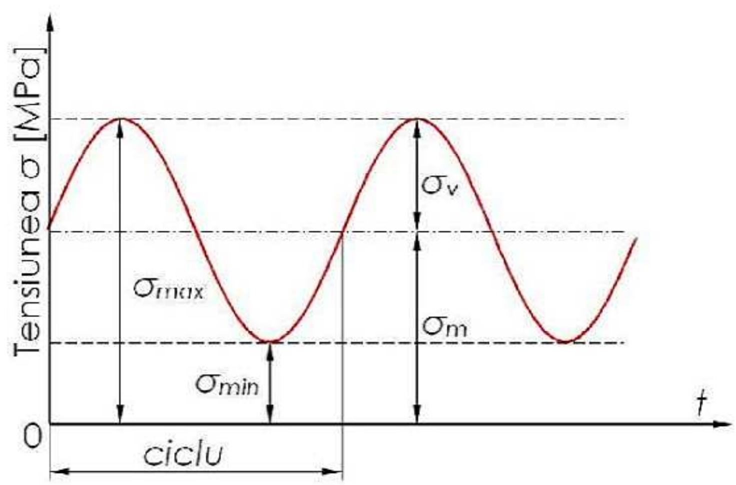


Fig. 1 *Mărimi definitorii pentru solicitarea variabilă*

Dacă tensiunile variază între aceleaşi valori σ_{min} şi σ_{max} pe toată durata de aplicare a solicitării variabile *ciclul* se numeşte *staționar*.

După valorile şi semnele algebrice pe care le au limitele σ_{min} şi σ_{max}, respectiv coeficientul de asimetrie R, există următoarele tipuri de cicluri:

– *ciclul alternant–simetric* caracterizat prin:

$$R = -1;\ \sigma_{max} = -\sigma_{min};\ \sigma_m = 0;\ \sigma_v = \sigma_{max};$$

– *ciclul asimetric* la care $R \neq -1$. Acesta se numeşte ciclu *oscilant* dacă tensiunile rămân de acelaşi semn (poate fi pozitiv sau negativ), iar cazul particular când una din valorile extreme ale tensiunii este zero poartă denumirea de *ciclu pulsant*. Ciclul pulsant pozitiv are caracteristica $R = 0$;

– *ciclul static* este un caz particular de solicitare variabilă cu $R = +1$.

Solicitările variabile, indiferent de tipul ciclului, determină apariția fenomenului de oboseală a materialului, care reprezintă cea mai frecventă cauză de deteriorare şi ieşire din funcțiune a organelor de maşini. Ruperea prin oboseală se produce după un anumit număr de cicluri pentru tensiuni mai mici decât tensiunile care produc deteriorarea prin rupere statică. În funcție de răspunsul (comportarea) metalului la solicitarea variabilă periodică se deosebesc două situații, [3].

Oboseala în domeniul durabilităților mari (peste 10^6 cicluri de solicitare) se dezvoltă în condițiile unor solicitări variabile la care tensiunea maximă şi amplitudinea tensiunii au valori mici comparativ cu caracteristicile statice de rezistență ale metalului, iar deformațiile metalului solicitat sunt în domeniul elastic.

Oboseala în domeniul durabilităților mici rezultă în condițiile unor solicitări variabile cu vârfuri şi amplitudini de tensiune de valori mari care determină deformații locale elasto-plastice.

2.2. Ruperea prin oboseală

Fenomenul fizic al ruperii prin oboseală este complex şi diferit de cel al ruperii la solicitări statice. Ruperea prin oboseală nu se produce brusc în întreaga secțiune a unei piese, ci parcurge trei etape (stadii) principale reprezentate în figura 2:

– *inițierea fisurii* are loc în zona unui concentrator (geometric, rugozitate, de material) care perturbă omogenitatea câmpului de tensiune determinând modificarea stării de tensiune (distribuția reală prezintă vârfuri de tensiune);

– *propagarea microfisurii* are loc continuu datorită condițiilor favorabile de evoluție a microfisurilor şi de coalescența lor în macrofisuri;

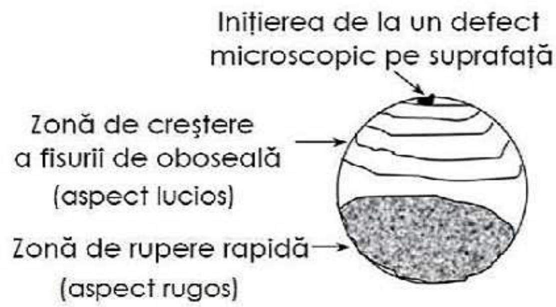


Fig. 2 *Stadiile dezvoltării deteriorării prin oboseală*

– *ruperea* finală are loc la atingerea dimensiunii critice de către una dintre fisuri, când se declanşează o rupere fragilă prin suprasolicitarea materialului din secțiunea rămasă.

Apariția şi dezvoltarea fisurii de oboseală pot fi evidențiate în secțiunea de rupere a unei piese, figura 3 şi figura 4 în care se indică şi zona de inițiere a fisurii de oboseală. Se observă două zone de oboseală care se propagă pe aproximativ 33 % din suprafața de rupere înainte de suprasolicitarea de torsiune, iar în zona 2 apar urme de oboseală şi oxidare.



Fig. 4 *Suprafața tipică de rupere prin oboseală*

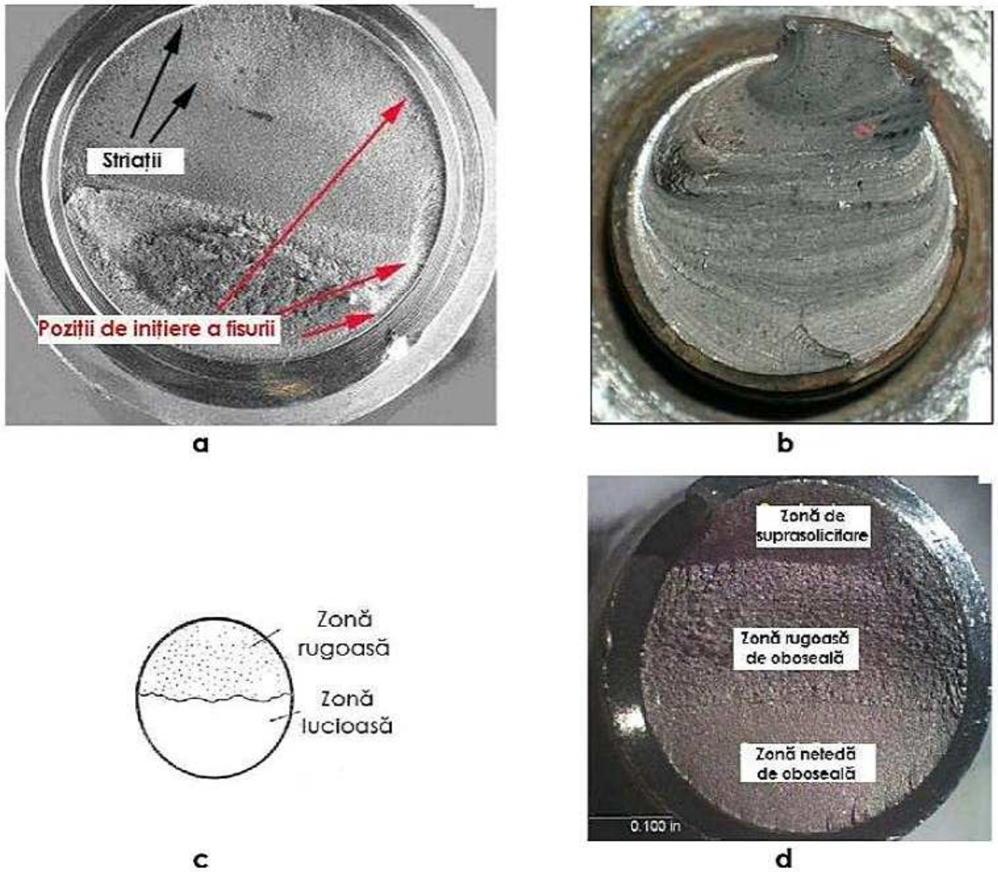


Fig. 5 *Aspectul secțiunii de rupere prin oboseală*

Ruptura prin oboseală a metalelor tenace are un aspect caracteristic, ca în figura 5, care permite să fie uşor identificată:

– tensiunea variabilă având amplitudini relativ mici, nu determină deformații plastice accentuate (fără gâtuirea ce precede ruperea statică), iar metalul se rupe similar celui fragil (figura 5.a);

– adeseori fisura de oboseală nu se propagă continuu, cu aceeaşi viteză, ci cu intermitențe (datorită perioadelor de oprire a maşinii sau de solicitare redusă care fac ca fisura să nu avanseze) cum arată figura 5.b;

– în secțiunea piesei apar două sau trei zone distincte (figura 5.c, 5.d): una lucioasă (netedă) – datorită frecării materialului în timpul dezvoltării fisurii şi una grăunțoasă (rugoasă) în partea în care are loc ruptura finală.

Figura 6 exemplifică organe de maşini cu distrugeri prin oboseală.



Fig. 6 *Exemple de rupere prin oboseală:*
a – arbore, b – ax de turbină, c – şurub, d – bielă, e – arbore cotit

2.3. Evaluarea comportării la oboseală

Principala metodă de evaluare a comportării la oboseală a materialelor o constitue încercarea pe epruvete netede la solicitări ciclice, de regulă alternant–simetrice, cu amplitudine constantă (*Wőhler*).

Forma şi dimensiunile epruvetelor utilizate la încercările de oboseală sunt reprezentate în figura 7.

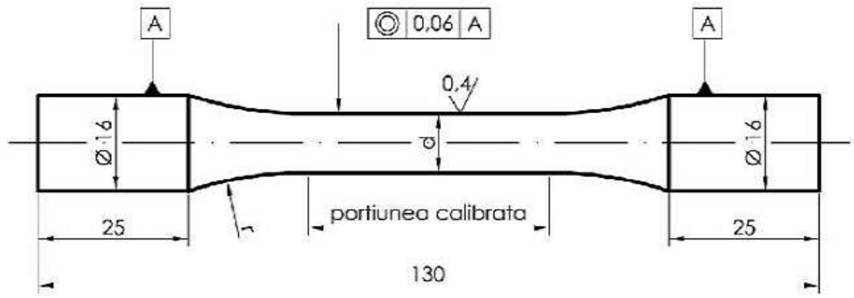


Fig. 7 *Forma constructivă a epruvetei*

Spre deosebire de caracteristicile de rezistență statice, care au valori bine determinate, orice material are o infinitate de rezistențe la oboseală, după valoarea coeficientului R de asimetrie a ciclului şi după tipul de solicitare (σ_{RN} sau τ_{RN}), dependente de numărul de cicluri de solicitare.

Prin reprezentarea grafică a numărului N de cicluri de solicitare şi rezistența la oboseală σ_{RN} corespunzătoare, se obține *curba caracteristică de oboseală* sau *curba Wőhler*, figura 8.

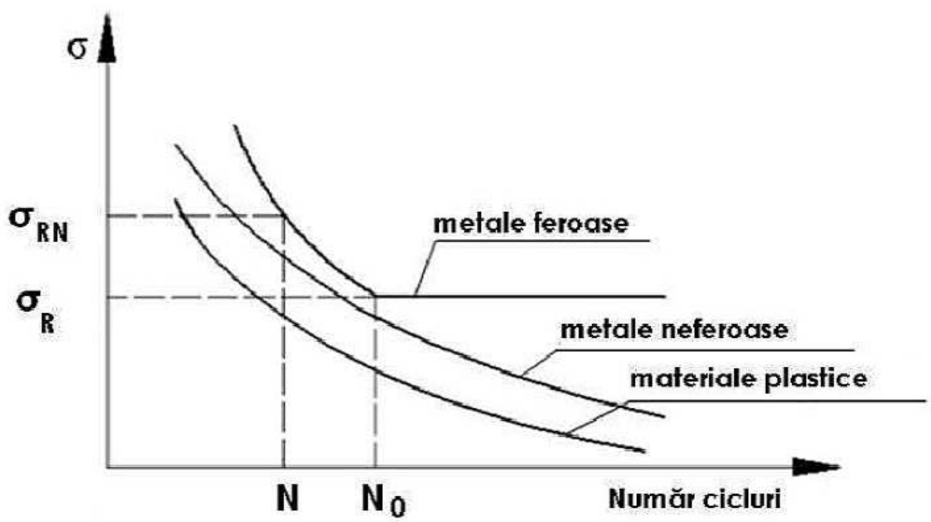


Fig. 8 *Curba caracteristică Wőhler (de durabilitate la oboseală)*

În forma tradițională, tensiunile sunt reprezentate la scară liniară, iar durabilitățile N la scară logaritmică (sistem de coordonate semilogaritmice). Dependența dintre rezistența la oboseală şi numărul de cicluri de solicitare se poate exprima analitic astfel:

– la *materiale feroase*:

– scădere exponențială după relația:

$$\sigma_{RN} = \sigma_R \cdot \left(\frac{N_0}{N}\right)^{1/m} \qquad \text{pentru} \quad N < N_0 \tag{4}$$

– palier orizontal

$$\sigma_{RN} = \sigma_R \qquad \text{pentru} \quad N \geq N_0 \tag{5}$$

unde N_0 reprezintă numărul de cicluri de bază stabilit convențional;

– la *materiale neferoase* şi *plastice* – sub formă exponențială dată de relația (4) fără existența palierului.

Tensiunea maximă pe care o epruvetă supusă unei solicitări variabile cu caracteristica R, în condiții ideale de încercare, o poate suporta fără apariția fenomenului de deteriorare prin oboseală se numeşte *limită de rezistență la oboseală* (*fatigue limit, limite de fatigue, Ermüdungsfestigkeit, predel ustalosti*) a materialului epruvetei pentru solicitarea în cauză.

Limita de rezistență la oboseală are notația standard σ_R, (τ_R) şi este dependentă de material, tipul solicitării şi forma geometrică, valori pentru câteva oțeluri fiind date în tabelul 1, [3].

Tabelul 1 *Caracteristici de rezistență la oțeluri*

Marca oțelului	**Tratamentul termic**	R_m N/mm²	$R_{p0,2}$ N/mm²	σ_{-1} N/mm²
1C35 (OLC 35)	Normalizare	511 - 594	310 - 383	269 - 308
	Îmbunătățire	604 - 882	475 - 772	337 - 431
1C45 (OLC 45)	Normalizare	608 - 680	348 - 409	279 - 343
	Îmbunătățire	672 - 852	441 - 660	350 - 431
1C60 (OLC 60)	Normalizare	687 - 748	360 - 445	308 - 333
	Îmbunătățire	712 - 937	521 - 663	392 - 450

Întrucât determinarea experimentală a limitei de rezistență la oboseală este o operație laborioasă există relații aproximative de apreciere a valorilor acesteia. Pentru *oțel carbon*, [2]:

$$\sigma_{-1t} = 0{,}315 \cdot R_m \tag{6}$$

$$\sigma_{0t} = (1{,}5 \ldots 1{,}8) \cdot \sigma_{-1t} \tag{7}$$

$$\sigma_{-1,min} = 0{,}44 \cdot R_m \tag{8}$$

$$\sigma_{-1,max} = \frac{R_m + R_{p0,2}}{4} + 50 \tag{9}$$

$$\sigma_0 = (1{,}6 \ldots 1{,}8) \cdot \sigma_{-1} \tag{10}$$

$$\tau_{-1} = (0{,}55 \ldots 0{,}58) \cdot \sigma_{-1} \tag{11}$$

$$\tau_0 = (1{,}8 \ldots 2) \cdot \tau_{-1} \tag{12}$$

3. Date experimentale

3.1. Maşina de încercat la oboseală

Analiza experimentală a influenței solicitărilor variabile asupra rezistenței metalelor se face prin încercări de oboseală realizate în condiții de laborator, folosind epruvete cu forme şi dimensiuni normalizate şi supuse unor solicitări cunoscute, cu variație continuă.

Maşinile de încercat la oboseală trebuie să realizeze:

– variația solicitării, în timp, între limitele maximă şi minimă după unul din tipurile de cicluri descrise anterior;

– modificarea tensiunilor σ_{min} şi σ_{max} la schimbarea epruvetei;

– eventual, schimbarea coeficientului de asimetrie a ciclului de solicitare (pentru a realiza diferite încercări la oboseală).

În cadrul lucrării experimentele se efectuează pe o maşină pentru încercări de oboseală la încovoiere rotativă, marca *MEFETRM* (Ungaria).

Schema maşinii [4] este prezentată în figura 9.a cu următoarele elemente constructive: *1* – epruveta, *2* – cuplaj elastic, care face legătura cu motorul electric de acționare, *3* – rulment oscilant de încărcare, *4* – contragreutate, *5* – mandrina pentru prinderea epruvetei, 6 – greutăți de încărcare. Maşina de încercări la oboseală este prevăzută cu un contor de ture care înregistrează numărul de cicluri până la ruperea epruvetei. Maşina foloseşte epruvete de secțiune circulară pe două reazeme, în mişcare de rotație cu turație constantă (2890 rot/min). Dimensiunile si abaterile epruvetelor sunt indicate în tabelul 2.

Sarcina constantă (produsă de greutăți) este de încovoiere pură realizată după *schema de încărcare* din figura 9.b.

Tabelul 2 *Dimensiuni şi abateri limită pentru epruvete*

Mărimea măsurată	**Valoarea**	**Toleranța**, mm
Diametrul *d*	10 mm	± 0,050
Raza de racordare *r*	$3 \cdot d$	± 0,5
Ovalitatea în zona de solicitare maximă		0,040

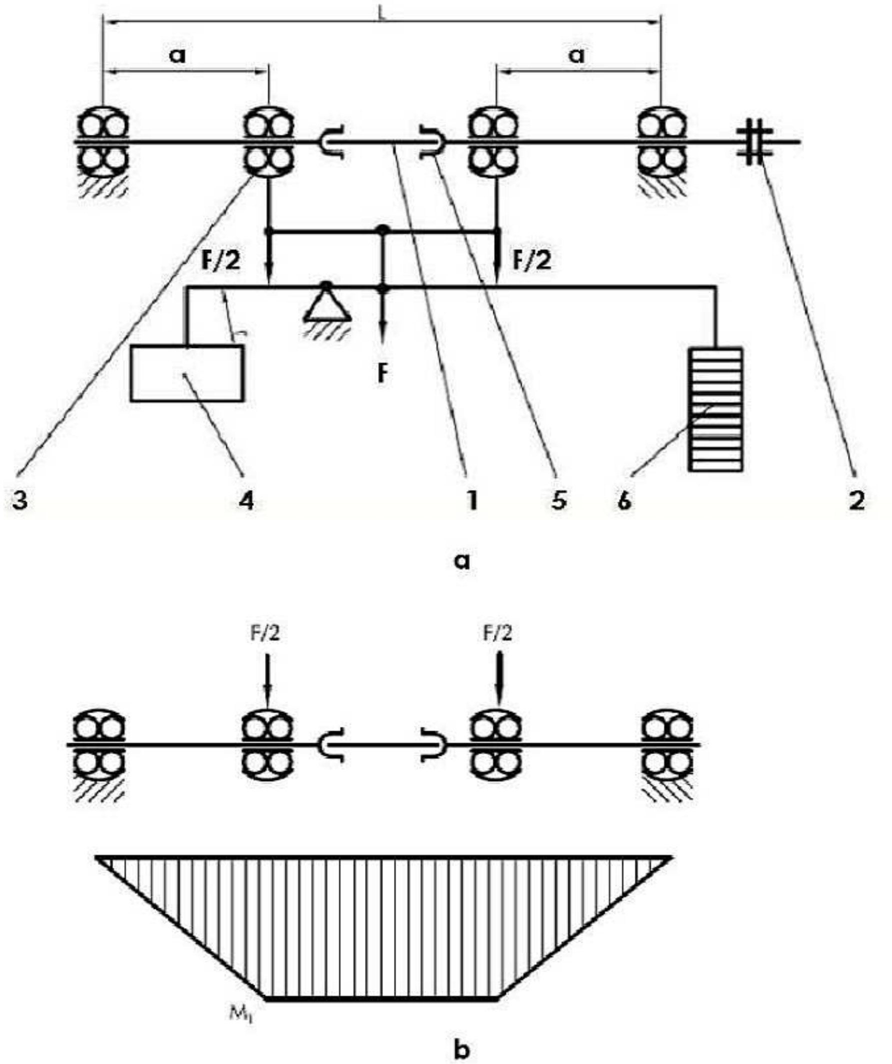


Fig. 9 *Maşina pentru încercări de încovoiere rotativă*

Pentru obţinerea unor rezultate corecte (precizia maşinilor trebuie să se încadreze în clasa de precizie 1%) este necesar ca la montarea epruvetei să nu se depăşească:

– abaterea maximă de la orizontalitate de 5 mm/m;

– bătaia radială maximă de ± 0,013 mm;

– abaterea maximă de la coaxialitate cu arborele motor de ± 0,025mm

Fixarea epruvetei pe toată durata încercării trebuie să fie fără alunecări. Numărarea ciclurilor de solicitare trebuie făcută cu o precizie de 200 cicluri şi trebuie oprită automat în momentul ruperii epruvetei.

3.2. Procedura de efectuare a încercărilor

Metoda de determinare a limitei de rezistenţă la oboseală constă în trasarea, pe bază de date experimentale, a curbei Wőhler:

$$\sigma_{RN} = \sigma(N) \tag{13}$$

unde: σ_{RN} este tensiunea maximă la care se rupe epruveta, N este numărul de cicluri de solicitare corespunzător ruperii.

Pentru încercare (stabilirea comportării materialului la solicitare variabilă) sunt necesare un număr minim de *6 – 8 epruvete*, din acelaşi material, obţinute prin acelaşi procedeu tehnologic, cu aceleaşi dimensiuni. Încercările trebuie efectuate pe aceeaşi maşină cu păstrarea condiţiilor de încercare (sarcină, turaţie).

Prima treaptă de solicitare se recomandă să fie:

– pentru oţeluri $\sigma_{max} = 0{,}6 \cdot R_m$

– pentru aliaje neferoase $\sigma_{max} = 0{,}4 \cdot R_m$

în care R_m este rezistenţa de rupere statică a materialului.

Repartizarea următoarelor trepte de solicitare se face astfel:

– în zona solicitărilor mari: treptele de tensiune să difere cu 30 – 60 MPa;

– în zona limitei de oboseală: treptele de tensiune să fie 10 – 20 MPa.

Se păstrează una sau două epruvete ca rezervă pentru eventualele repetări ale încercărilor care au condus la puncte prea îndepărtate de curba medie.

Se continuă încercările la oboseală până când se ajunge ca cel puţin o epruvetă să nu se rupă. Numărul de cicluri N_0 după care epruvetele nu se mai rup poate avea valori între:

$2 \cdot 10^6 – 2 \cdot 10^7$ pentru oţeluri;

$2 \cdot 10^7 – 2 \cdot 10^8$ pentru aliaje uşoare.

În funcţie de numărul de epruvete disponibile se pot încerca, la fiecare treaptă de tensiune, una sau mai multe epruvete.

3.3. Prelucrarea şi interpretarea rezultatelor experimentale

Întrucât încercările la oboseală sunt de durata a sute de ore, se vor folosi, pentru prelucrare şi interpretare, date experimentale obţinute prealabil (*ANEXA 2 „Încercări de oboseală – rezultate experimentale”*).

Pentru exemplificare s-au considerat epruvetele din *1C45* (OLC 45) normalizat (tabelul 3).

a) Utilizând softul MATLAB, [5], [6] se trasează *curba de oboseală în coordonate rectangulare* (N, σ_{RN}) ca în figura 10 şi se determină *limita de rezistenţă la oboseală*.

b) Se trasează curba de oboseală în coordonate dublu logaritmice $(\lg N, \lg \sigma_{RN})$ ca în figura 11 şi se determină exponentul *m* direct din grafic (panta) sau folosind relația (4).

Pe baza graficului obținut (figura 10) se determină limita de rezistență la oboseală a materialului 1C45 normalizat, σ_{-1} = 320 MPa.

Tabelul 3 *Rezultate experimentale - Lotul1 1C45* (OLC 45) *normalizat*

σ_{-1N} [MPa]	525	490	455	420	403	386	370	353	336	330	325	320
N [10^6]	0,11	0,21	0,42	0,86	1,24	1,82	2,70	4,09	6,33	7,58	8,69	10,0

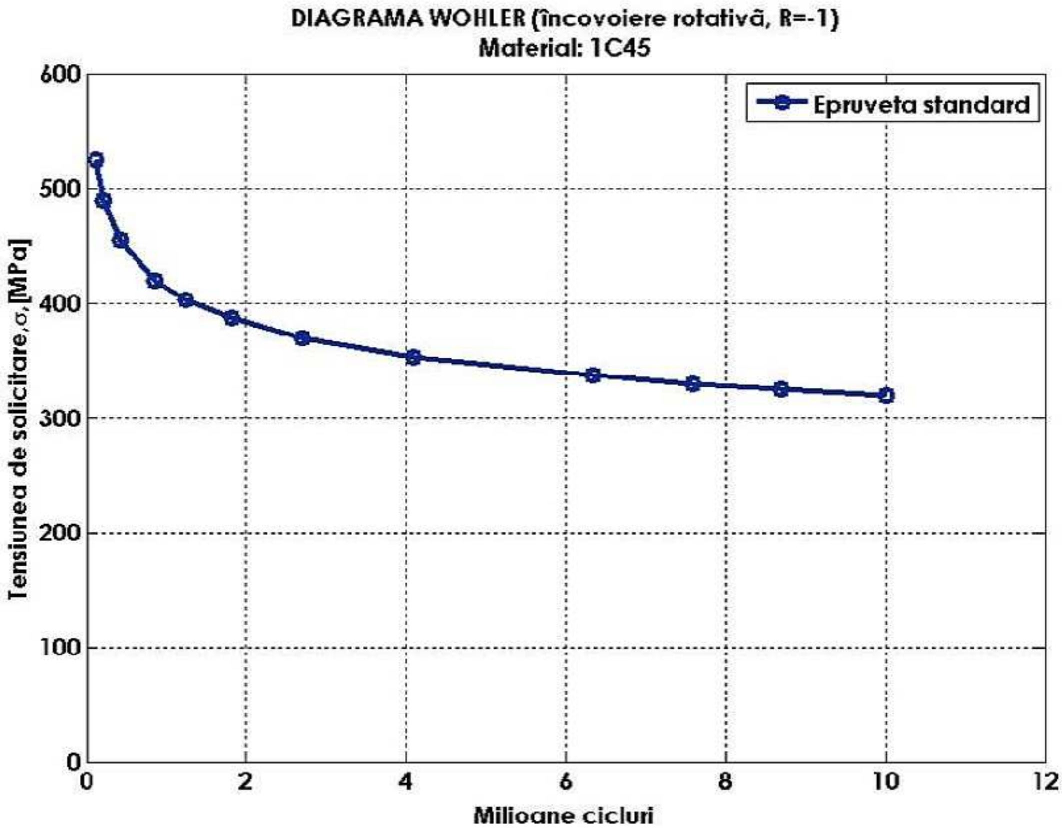


Fig. 10 *Trasarea curbei de rezistență la oboseală (Wőhler)*

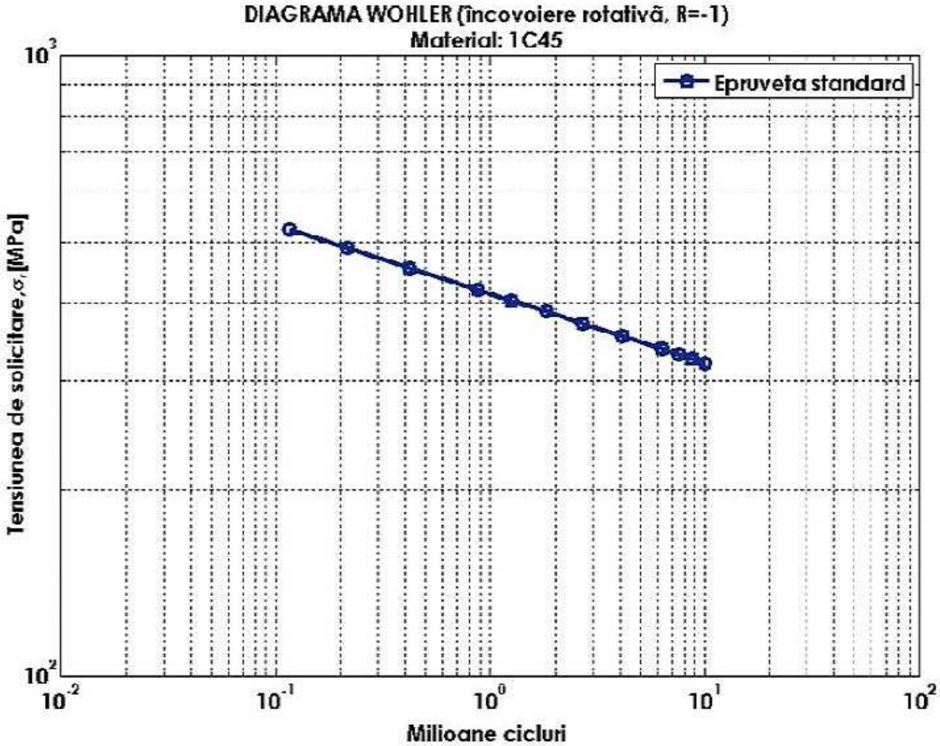


Fig. 11 *Curba de rezistență la oboseală în coordonate logaritmice*

Exponentul curbei Wöhler rezultă:

$$m = \frac{\log \frac{N_0}{N}}{\log \frac{\sigma_{-1N}}{\sigma_{-1}}} = \frac{\log \frac{10}{0{,}11}}{\log \frac{525}{320}} = 9{,}1 \qquad (14)$$

Bibliografie

1. Collins, J.A., 2003, *Mechanical Design of Machine Elements and Machines. A Failure Prevention Perspective*, John Wiley & Sons. Inc., USA.
2. Gafițanu, M., Crețu, S., Pavelescu, D., ş.a., 1981, *Organe de maşini*, vol. I, Ed. Tehnică, Bucureşti.
3. Rusu, O., Teodorescu, M., Laşcu-Simion, N., 1992, *Oboseala materialelor*, I, II, Ed. Tehnică, Bucureşti.
4. Gafițanu, M., Crețu, S., Bariz, Gh., Olaru, D., Racocea, C., Hagiu, Gh., Oancea, I., Ştirbu, C., Ivănică, Grigoraş, Ş., 1985, *Organe de maşini. Îndrumar de laborator*, Rotaprint, Iaşi.
5. http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf
6. http://www.mathworks.com/academia/student_center/tutorials/launchpad.ht ml